


На правах рукописи



Ершов Александр Алексеевич

**ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ УПРОЧНЕНИЯ МАТЕРИАЛА
НА ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ
В ПРОЦЕССАХ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ**

05.16.05 - Обработка металлов давлением

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Екатеринбург - 2014

Работа выполнена в ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор Логинов Юрий Николаевич.

Официальный оппоненты:

Готлиб Борис Михайлович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Уральский государственный университет путей сообщения», профессор кафедры «Мехатроника»;

Муйземнек Ольга Юрьевна, кандидат технических наук, ФГБУН Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук, старший научный сотрудник лаборатории механики деформаций.

Ведущая организация:

ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет), г. Челябинск.

Защита состоится **«12» декабря 2014** года в **16³⁰** на заседании диссертационного совета Д 212.285.04 на базе ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по адресу: 620002, г.Екатеринбург, К-2, ул.Мира, 28, в аудитории Мт-329, Институт материаловедения и металлургии.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <http://dissovet.science.urfu.ru/news2/>

Автореферат разослан « » **ноября 2014 г.**

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.285.04



Л.А. Мальцева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования заключается в том, что за последние несколько десятков лет большие успехи достигнуты в изучении реологии металлов и сплавов, применяемых в качестве конструкционных материалов. Это объясняется появлением новой, более точной и чувствительной аппаратуры для измерения физических и механических свойств, появлением новых методик измерений, введением в оборот новых характеристик этих свойств. В связи с такими изменениями появилась необходимость получения новых решений краевых задач в механике деформируемого тела, которые более полно учитывали бы особенности реологии материалов.

Степень разработанности темы включает в себя решение краевых задач осадки, прессования и листовой штамповки. Выбор такого круга вопросов обусловлен тем, что упомянутые процессы в практике обработки металлов давлением имеют большой удельный вес. Во всех случаях анализа упомянутых процессов достигнутые решения описывают не среднеинтегральные характеристики процессов, а дают представление о напряженно-деформированном состоянии деформируемого материала в физической точке на уровне тензорных величин.

Целью работы является выявление влияния вида кривой упрочнения на напряженно-деформированное состояние в операциях осадки, прессования и листовой штамповки для уточнения последствий термомодеформационного воздействия на материал.

Задачами исследования являются:

1. Исследовать влияние управляющих факторов, в том числе вида кривой упрочнения, на процесс осадки.
2. Исследовать влияние вида кривой упрочнения деформируемого материала на параметры деформации в производстве прутков и труб.
3. Исследовать влияние кривой упрочнения на формоизменение при листовой штамповке.

Научная новизна работы заключается в установлении значимых изменений напряженного и деформированного состояния заготовок в операциях осадки, прессования и листовой штамповки при изменении вида кривых упрочнения материалов.

Теоретическая значимость работы заключается в результатах математического моделирования процессов осадки, прессования и листовой штамповки, которые расширяют знания об этих процессах деформации: расчет

напряженно-деформируемого состояния и тепловых полей, определение формоизменения с учетом сложного характера кривых упрочнения.

Практическая значимость работы состоит:

- в разработке нового метода обработки альфа-титановой заготовки с учетом оптимизации параметров Кернса (патент РФ №2504598),
- в разработке нового метода изучения трения в процессе осадки призматических образцов (патент РФ №2505797),
- в уточнении приемов алгоритмизации метода конечных элементов (письмо разработчика программного обеспечения),
- в применении программных модулей для решения краевых задач по заявкам различных предприятий (акт внедрения ООО «ПЛИМ Урал»).

Методология исследования построена на основных концепциях механики деформируемого тела, в том числе на применении основных гипотез и соответствующего математического аппарата.

Методы исследования включают:

- аналитическое определение напряженно-деформированного состояния на основе решения основной системы дифференциальных уравнений, сформулированной в рамках теории пластичности,
- приближенное решение краевых задач методом конечных элементов в программных модулях Deform, Рапид, Abaqus, QForm, PAM-Stamp,
- экспериментальное моделирование процесса деформации с использованием модельных материалов,
- статистическую обработку результатов расчетов и измерений.

Положения, выносимые на защиту:

- сравнительный анализ определения напряженно-деформированного состояния и формоизменения в процессах осадки, прессования и листовой штамповки при различном характере кривых упрочнения деформируемых материалов;
- методика изучения трения в процессе осадки призматических образцов;
- способ управления параметрами Кернса в процессе производства труб из альфа-титановых сплавов;
- сравнительный анализ результатов решения краевых задач различными конечно-элементными методами.

Степень достоверности результатов подтверждена статистической обработкой полученных данных, сравнением с известными аналогами из технической литературы.

Апробация результатов работы выполнена путем докладов итогов исследований на конференциях и публикацией в рецензируемых изданиях, в том числе, зарубежных и из перечня ВАК.

Работа выполнена в рамках исследований, включенных в следующие научные программы:

- Федеральная целевая программа «Научные и педагогические кадры инновационной России» Министерства образования РФ, государственный контракт от 22 марта 2010 г. № 02.740.11.0537,
- НИР № Н97742Б012/12 в рамках государственного задания на 2011-2013 г.г. «Развитие физики и механики обработки металлов давлением с целью создания научных основ технологических процессов производства металлургической продукции».

Публикации. Основное содержание диссертационной работы изложено в 18 научных статьях, из них 11 опубликованы в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендуемых ВАК, а также в описаниях двух патентов на изобретения.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, изложена на **169** страницах машинописного текста и содержит **7** таблиц, **90** рисунков, **2** приложения и список использованной литературы, содержащий **143** наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулирована актуальность темы диссертации, цель и задачи работы, дана характеристика ее научной новизны, теоретической и практической значимости.

Первая глава посвящена обзору исследований о материалах с отклонениями от закона упрочняющейся среды, о влиянии вида нагружения на формирование свойств деформируемых сред, а также описанию применяемых программных средств для выполнения расчетов напряженно-деформированного состояния. На основании выполненного обзора сформулированы задачи исследования.

Во второй главе изложено исследование влияния управляющих факторов на процесс осадки.

В первом параграфе показано влияние вида кривой упрочнения на локализацию деформации при осадке цилиндрических заготовок. Применен программный комплекс QFORM-2D, разрабатываемый и поддерживаемый

компанией ООО «КванторФорм», г. Москва. Этот комплекс позволяет задавать широкий спектр свойств деформируемого материала.

Для оценки влияния эффекта разупрочнения постановка задачи максимально упрощена по заданию реологических свойств и граничных условий, эти граничные условия одинаковы для трех вариантов решения задачи:

- Постановка 2D осесимметричная, изотермическая
- Условия на контакте с инструментом описываются законом трения Кулона, коэффициент трения равен 0,3
- При относительном обжатии $\varepsilon = 50\%$ упрочняемая среда упрочняется за счет изменения сопротивления деформации от $\sigma_{s0} = 100$ МПа до $\sigma_{s1} = 200$ МПа; ($\sigma_{s1} / \sigma_{s0} = 2$), разупрочняемая среда разупрочняется при изменении σ_s от 100 МПа до 50 МПа ($\sigma_{s1} / \sigma_{s0} = 0,5$), а неупрочняемая описывается постоянным значением σ_s равным 100 МПа ($\sigma_{s1} / \sigma_{s0} = 1$).

Результаты моделирования представлены на рисунке 1.

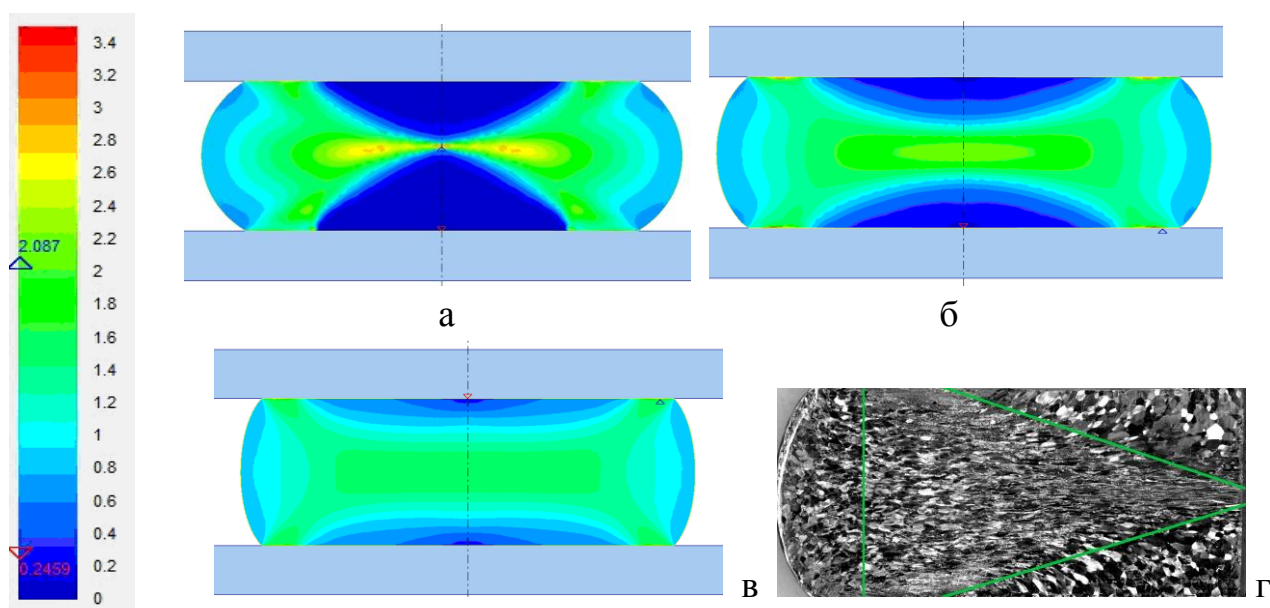


Рисунок 1 - Области равного уровня степени деформации (числа на шкале) при осадке заготовки с различными отношениями $\sigma_{s1} / \sigma_{s0}$: 0,5 (а), 1 (б) 2 (в) и структура осаженного образца из сплава ВТ22(г): проведены линии, разделяющие области с различной интенсивностью деформации

Выполненные расчеты показали, что наряду с контактными условиями трения и теплопередачи вид зависимости сопротивления деформации от степени деформации существенным образом влияет на однородность распределения деформации по объему заготовок при их осадке.

Для проверки полученных результатов выполнено сравнение распределения степени деформации со структурой образца из сплава ВТ22 при температуре 900° С. Относительное обжатие 60%. Для приближения к изотермической постановке опыта контактные поверхности защищали асбестовыми прокладками, которые нагревали совместно с образцом. На рисунке 1, г отображена структура образца в диаметральном сечении (левая половина заготовки). Анализ рисунка показывает чередование мелких зерен с более крупными, при этом часть зерен вытянута в определенном направлении, что свидетельствует об интенсивном течении металла. Зоны заторможенной деформации располагаются ближе к центру контактной поверхности и проникают на большую глубину, практически смыкаясь в центре заготовки. Это соответствует схеме деформации рисунка 1а для материала со свойствами разупрочняемой среды.

Действительно, анализ кривых упрочнения сплава ВТ22 показывает, что этот вид материала для всех случаев деформации показывает свойства разупрочнения.

Это сравнение показывает, что наиболее близким описанием деформируемого материала в этом случае является вариант среды с разупрочнением. Варианты расчета процесса осадки для сред с упрочнением не дают адекватной картины деформированного состояния.

Для оценки неоднородности распределения деформаций применены несколько показателей, которые приведены в таблице 1:

- отношение D_{δ}/D_{κ} диаметра заготовки по бочке D_{δ} к диаметру по контактной поверхности D_{κ} ;
- отклонение δ текущего показателя D_{δ}/D_{κ} от показателя, установленного для неупрочняемого материала;
- минимальная степень деформации по объему заготовки ε_{\min} ;
- максимальная степень деформации по объему заготовки ε_{\max} ;
- соотношение максимальной и минимальной степеней деформации $k_{\varepsilon} = \varepsilon_{\max} / \varepsilon_{\min}$

Таблица 1 - Показатели неоднородности деформации при различных отношениях $\sigma_{s1} / \sigma_{s0}$

$\sigma_{s1} / \sigma_{s0}$	D_{δ}/D_{κ}	$\delta, \%$	ε_{\min}	ε_{\max}	k_{ε}
0,5	1,204	+5,4%	0,00	3,23	9250
1,0	1,142	0	0,05	3,73	68
2,0	1,088	-4,7%	0,25	2,09	8

Установлено, что в сопоставимых условиях при переходе от материала с соотношением конечного и начального сопротивления деформации 2 к 0,5 соотношение максимальной и минимальной степени деформации изменяется от 8 до 9250, т.е. более чем в 1000 раз.

Во втором параграфе рассмотрено управление формоизменением квадратной в плане заготовки при осадке, такой процесс востребован в ювелирной промышленности и применяется в целях снижения отходов дорогостоящих металлов.

При проведении исследования был осуществлен ряд лабораторных испытаний, а также проведено моделирование методом конечных элементов на осадку технического свинца с целью получения круглой в плане заготовки из квадратной заготовки (рисунок 4).

В опытах варьировали высоту заготовок h_0 , для приведения ее к безразмерному виду использовали параметр h_0/a , где a – сторона квадрата. Изменяли также относительное обжатие $\varepsilon\% = 100 \cdot (h_0 - h_1)/h_0$, а также условия трения в трех вариантах:

- применение шлифованных бойков со смазкой состава: 50% солидола+50% чешуйчатого графита;
- применение шлифованных бойков без смазки (рисунок 5а);
- применение рифленых бойков без смазки (рисунок 5б).

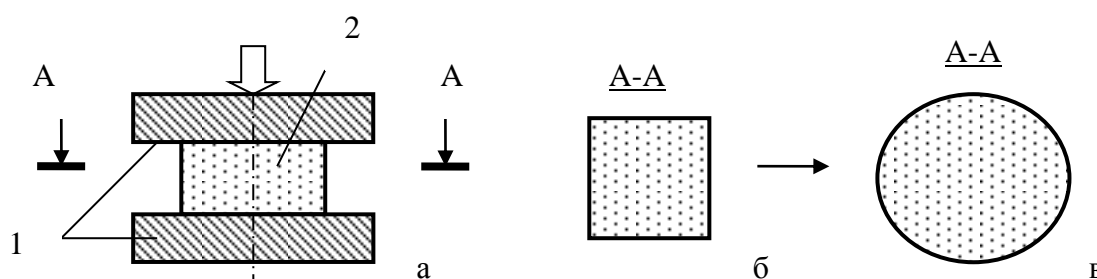


Рисунок 4 - Схема преобразования квадратной в плане заготовки в круглую: 1 – бойки, 2 – заготовка; а – схема осадки, б – вид в плане исходной заготовки, в – вид в плане осаженой заготовки

В опытах выявили, что применение шлифованных бойков со смазкой приводит к равномерной осадке с сохранением формы квадрата, что нежелательно для решения поставленной задачи.

Также было определено, что состояние заготовки характеризуется наличием зон интенсивной и затрудненной деформации, при этом степень локализации деформации возрастает с повышением коэффициента трения. Одна из зон затрудненной деформации локализована в середине заготовки, а другая – на

периферии Результаты расчета приведены в диссертации к табличной форме в виде картин распределения степени деформации в функции от коэффициента трения μ .

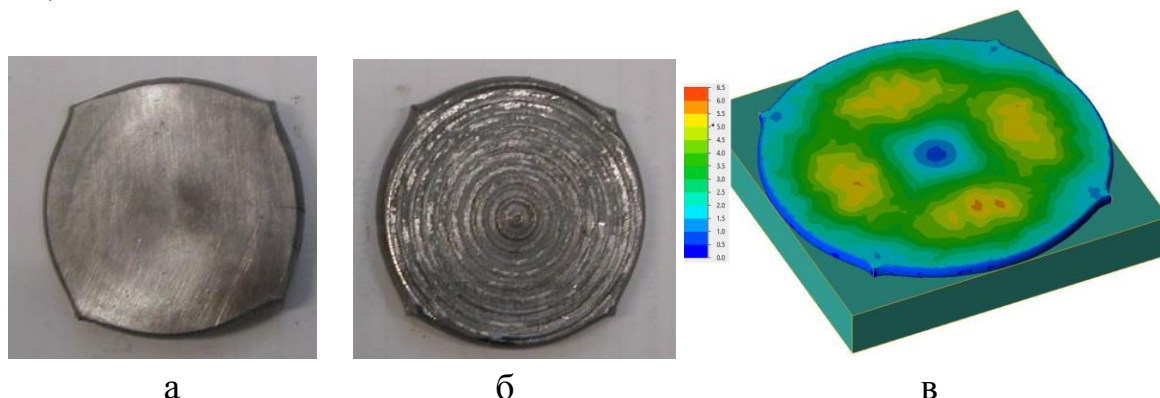


Рисунок 5 - Фото образцов, осаженных на шлифованных (а) и рифленых (б) бойках при отношении $h_0/a = 1$ и относительном обжатии 70%, а также расчетный вариант осадки с областями равного уровня степени деформации (в)

Выявлено, что кривизна боковой поверхности увеличивается при повышении коэффициента трения и относительного обжатия. Кроме того, установлено, при каких сочетаниях этих параметров достигается форма заготовки, приближенная к кругу.

Аналитическим путем найдено соотношение между стороной квадратной исходной заготовки a и радиусом кривизны R_1 получаемой заготовки при полной трансформации квадратного сечения в круглое: $a/R_1 = \sqrt{\pi(1 - \varepsilon/100)}$.

При $\varepsilon = 0$ показатель a/R_1 приобретает значение 1,77, а при $\varepsilon = 100\%$ показатель $a/R_1 = 0$. Вид этой функции показан на рисунке 6 штриховой линией L .

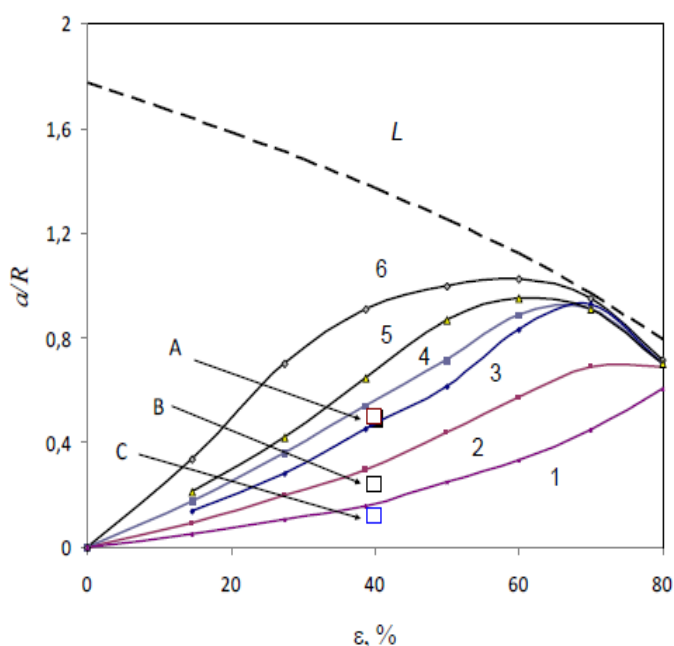


Рисунок 6 - Зависимость параметра a/R от обжатия при различных коэффициентах трения μ : 1 – 0,05, 2 – 0,1, 3 – 0,15, 4 – 0,25, 5 – 0,3, 6 – 0,5; точками в виде квадратов помечены данные, полученные после реальных экспериментов по осадке образцов до $\varepsilon = 40\%$: при осадке: А – на рифленых бойках; В – на шлифованных бойках без смазки; С – на шлифованных бойках со смазкой

После проведения дополнительного исследования была предложена методика оценки коэффициента внешнего трения при деформации металлов, основанная на осадке образцов, имеющих квадратное в плане сечение, измерении радиуса кривизны боковых сторон образца и определение коэффициента трения по специально построенным диаграммам (патент РФ № 2505797).

Для получения достоверных результатов предложено применять образцы с отношением высоты к стороне квадрата около 0,1...0,3 и применять относительные обжатия в опытах на уровне 40...60%.

В третьей главе исследованы взаимосвязи свойств материала и параметров деформации при производстве прутков и труб, в основном, методом прессования.

При начальном рассмотрении процесса прессования показано различие между решениями задачи, полученными аналитическим методом и методом конечных элементов. Различие заключается в несовпадении значений тангенциальных и радиальных компонент тензоров деформаций и скоростей деформаций.

В аналитическом варианте расчетов, основанных на кинематически возможном поле скоростей, предложенном Л.Г.Степанским, выполнено интегрирование и получены формулы для компонент тензора деформаций $\varepsilon_{\varphi\varphi}$ и $\varepsilon_{\theta\theta}$ (в сферической системе координат $r\varphi\theta$) следующего вида

$$\varepsilon_{\varphi\varphi} = \int_t^a \xi_{\varphi\varphi} d\tau = \int_b^a \xi_{\varphi\varphi} d\frac{\rho}{v_\rho} = -\frac{1}{2} \ln \lambda; \quad \varepsilon_{\theta\theta} = \int_t^a \xi_{\theta\theta} d\tau = \int_b^a \xi_{\theta\theta} d\frac{\rho}{v_\rho} = -\frac{1}{2} \ln \lambda,$$

где $\xi_{\varphi\varphi}$ и $\xi_{\theta\theta}$ - компоненты тензора скорости деформации, v_ρ - проекция вектора скорости на ось ρ ; λ - коэффициент вытяжки. Тем самым показано, что классическое решение задачи прессования дает одинаковые значения компонент тензора деформации $\varepsilon_{\varphi\varphi}$ и $\varepsilon_{\theta\theta}$, что приводит к равенству тангенциальной и радиальной компонент в цилиндрической системе координат.

Соотношения между компонентами тензора деформации оценивали с помощью коэффициентов деформационной анизотропии $k_{\varepsilon r} = \frac{\varepsilon_{rr}}{\varepsilon_{\varphi\varphi}}$ (область

определения $k_{\varepsilon r} = -\infty \dots \infty$) и $k_{\varepsilon r\varphi} = \frac{\varepsilon_{rr}}{\varepsilon_{\varphi\varphi} + \varepsilon_{rr}}$ (область определения $k_{\varepsilon r\varphi} = 0 \dots 1$).

Аналогично этому можно ввести понятие коэффициентов скоростной анизотропии (прилагательное «скоростной» относится к скорости деформации,

т.е. оценивается соотношение скоростей по ортогональным координатам) $k_{\xi_r} = \frac{\xi_{rr}}{\xi_{\varphi\varphi}}$ и $k_{\xi_{r\varphi}} = \frac{\xi_{rr}}{\xi_{\varphi\varphi} + \xi_{rr}}$.

Если компоненты ξ_{rr} и $\xi_{\varphi\varphi}$ равны, то текстурное состояние металла в этом способе обработки на оси заготовки изменяться не должно, поскольку $k_{\xi_r} = \frac{\xi_{rr}}{\xi_{\varphi\varphi}} = 1$, а $k_{\xi_{r\varphi}} = \frac{\xi_{rr}}{\xi_{\varphi\varphi} + \xi_{rr}} = 0,5$.

Однако в последующих расчетах методом конечных элементов выявлено преобладание радиальной компоненты деформации по сравнению с тангенциальной компонентой в периферийной части пресс-изделия (рисунок 7). Отношение радиальной и тангенциальной компонент возрастает при уменьшении коэффициента вытяжки.

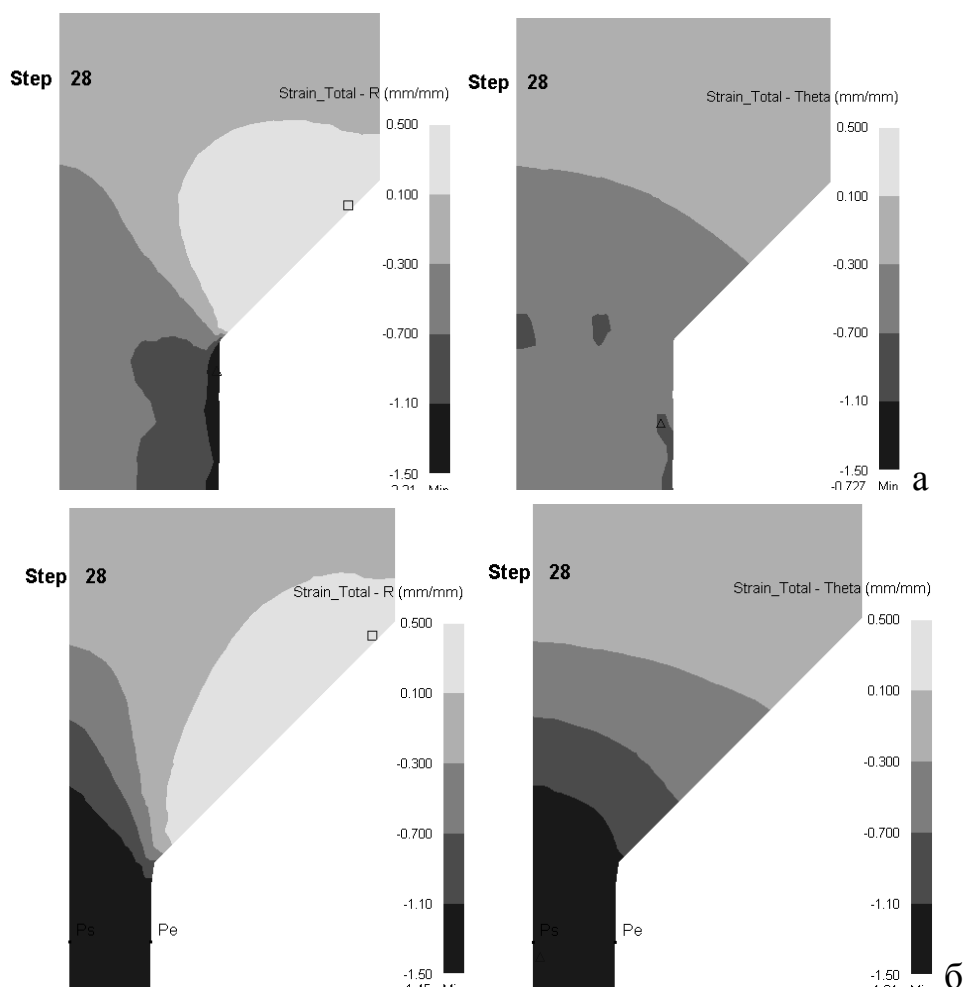


Рисунок 7 - Распределение радиальной (слева) и тангенциальной (справа) компоненты деформации (уровни и числа при шкале) при коэффициентах вытяжки 4(а) и 16(б)

Сделан прогноз преобладания радиальной текстуры над тангенциальной в периферийных областях пресс-изделия при прессовании альфа-сплавов титана с малыми коэффициентами вытяжки. Кроме того, выполнены тестовые проверки адекватности решения задачи прессования двумя системами расчета DEFORM-2D и DEFORM-3D при полном совпадении начальных и граничных условий. Выявлены различия в получаемых решениях, особенно значимые при больших коэффициентах вытяжек.

Для решения той же задачи – управления текстурой, предложен метод обработки альфа-титановой заготовки с учетом оптимизации параметров Кернса (патент РФ № 2504598).

Данная технологическая схема обработки состоит в том, что на первом этапе получают заготовки в виде колец, на втором этапе заготовки в виде колец подвергают деформации с уменьшением толщины стенок колец и получением колец увеличенного диаметра. Полые заготовки можно изготавливать в форме колец с использованием известных методов обработки металлов давлением, например, метода прессования или метода кузнечной прошивки и последующей резкой на мерные длины (рисунок 8).

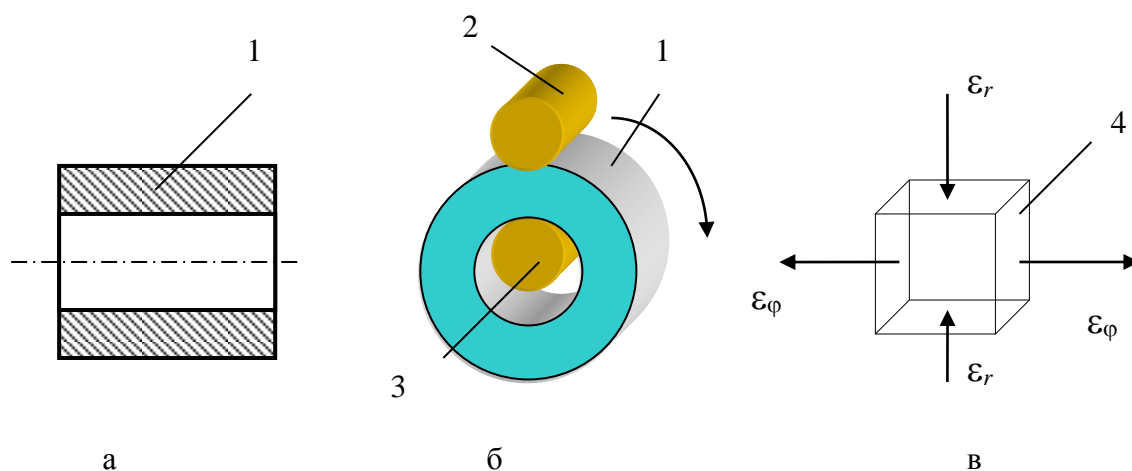


Рисунок 8 - Последовательность обработки полый заготовки 1(а), валками кольцепрокатного стана 2 и 3(б) и достигаемая схема деформированного состояния, отображенная на элементарном объеме 4 (в)

Завершающая или заключительная стадия прессования происходит с образованием специфического дефекта в виде центральной пресс-утяжины. Разработчиками прессового инструмента преследуется здесь следующая цель – всячески затормозить радиальное пластическое течение материала.

Постановку задачи моделирования осуществляли в программном комплексе QFORM 7. Рассматривается задача прессования прутка круглого поперечного сечения из круглого контейнера диаметром полости $D = 200$ мм в изотермической постановке. Металл прессуют через плоскую матрицу при фиксированной длине калибрующего пояска 6 мм. Диаметр выходного отверстия матрицы по калибрующему пояску d изменяется в зависимости от коэффициента вытяжки и составляет 100, 70 и 50 мм для моделирования коэффициентов вытяжки соответственно 4, 8(округлено от 8,1632) и 16. На всех поверхностях контакта заготовки и инструментов задан показатель трения по Зибелю 0,4. Скорость движения пуансона 10 мм/с. Для проверки устойчивости решения применены постановки в 2D и 3D пространствах.

Рассмотрены следующие варианты постановки задачи по типу материала заготовки с введением следующих обозначений (рисунок 9): У - упрочняющийся материал; Н - неупрочняемый материал; Р – разупрочняющийся материал; PLC - материал с циклическим упрочнением-разупрочнением.

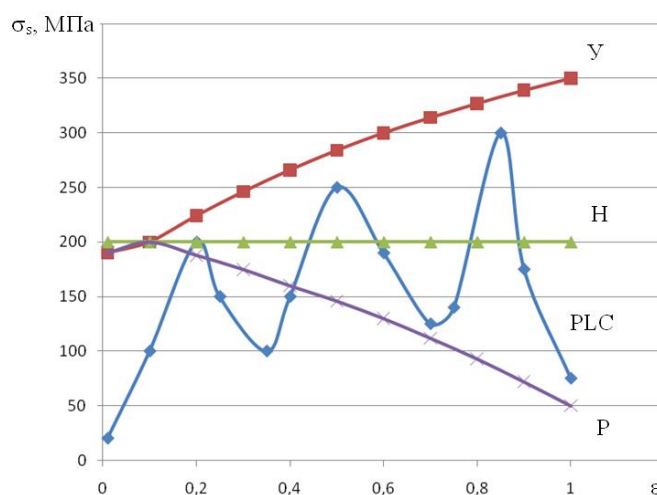


Рисунок 9 - Вид кривых упрочнения, используемых в расчетах: У - упрочняющийся материал; Н - неупрочняемый материал; Р – разупрочняющийся материал; PLC - материал с циклическим упрочнением-разупрочнением

Часть результатов решения представлена на рисунке 10 в виде продольного сечения очага деформации, полученного в 2D решении для коэффициента вытяжки 8, с выделением профиля пресс-утяжины (штриховая линия), здесь приведена половина очага деформации. Отображен также полный профиль очага деформации в 3D – решении с распределением степени деформации.

Приведенные изображения дают представление о форме пресс-утяжины и ее глубине. Выявлено, что глубина проникновения пресс-утяжины уменьшается при смене вида материала в последовательности У – Н – Р. Картины

деформированного состояния показывают, что степень деформации нарастает по направлению к пресс-утяжине, максимальное значение ε достигается в случае прессования упрочняемого материала (рисунок 9, У).

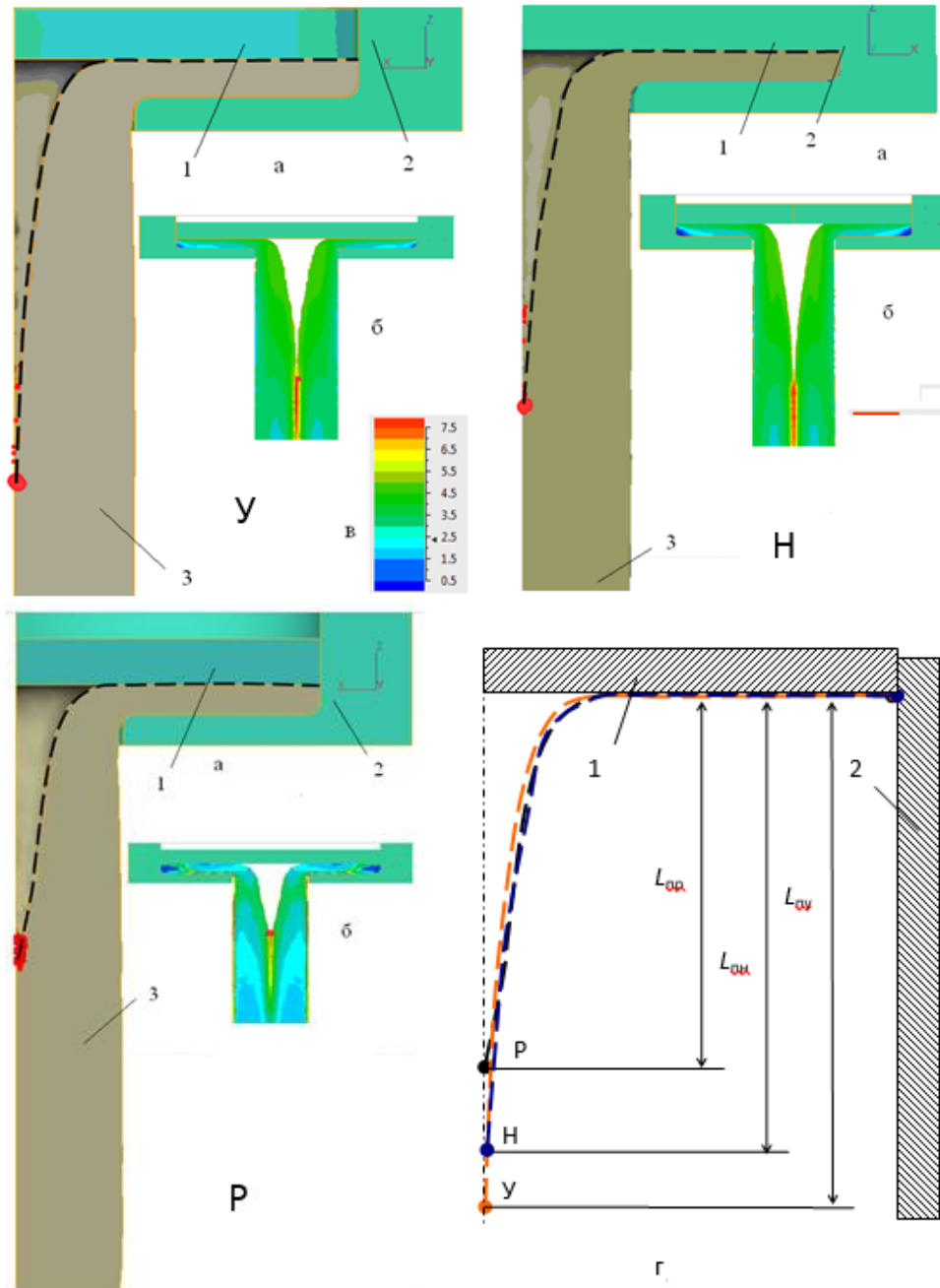


Рисунок 10 - Профиль пресс-утяжины (выделена штриховой линией) в 2D-контейнера 2 прутка 3 из материалов типа У, Н, Р с коэффициентом вытяжки 8(a), то же для 3D – решения с распределением степени деформации(б) в соответствии с цветовой гаммой (в); профили (штриховые линии) и длина ($L_{п}$) пресс-утяжины при различных типах прессуемого материала(г)

В дальнейшем глубину проникновения пресс-утяжины оценивали безразмерным параметром $L_{\text{п}}/d$ как отношение размерной глубины $L_{\text{п}}$ к диаметру получаемой заготовки d .

Зависимости параметра $L_{\text{п}}/d$ от коэффициента вытяжки и вида материала представлены на рисунке 11. Из него видно, что при увеличении коэффициента вытяжки для материалов типа У, Н, Р относительная глубина проникновения пресс-утяжины возрастает. Такие данные хорошо согласуются с практикой прессового производства, из которой известно, что для тонких полуфабрикатов, прессуемых с большими коэффициентами вытяжки, длина пресс-утяжины может оказаться значительной и составлять несколько метров.

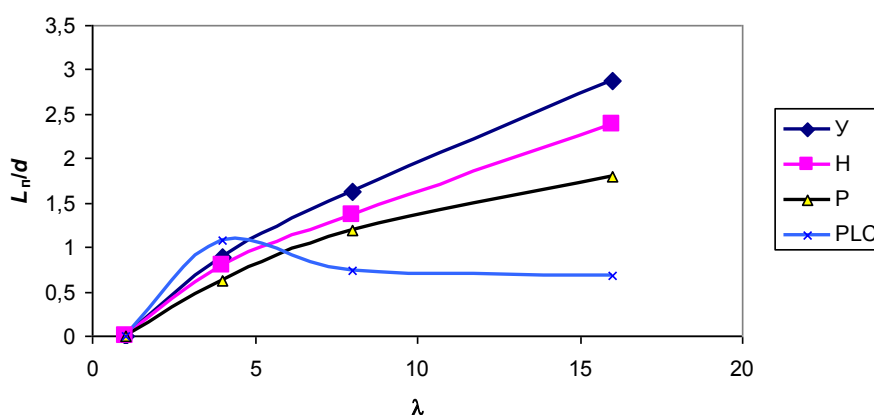


Рисунок 11 - Зависимость относительной глубины проникновения пресс-утяжины от коэффициента вытяжки и вида материала (обозначения в табличке)

Полученные результаты позволили сделать вывод в возможности нахождения путей снижения протяженности пресс-утяжины: для этого надо перейти в режимы деформации, обеспечивающие разупрочнение материала. Например, эффект разупрочнения достигается за счет снижения скорости деформации и изменения температурных интервалов прессования.

Для изучения влияния состояния поставки материала на формоизменение при листовой штамповке был проведен ряд расчетов методом компьютерного моделирования в программе PAM-Stamp, результаты которых представлены в **четвертой главе**.

Получены данные о применимости обратного решателя для быстрого расчета и получения данных о состоянии изделия после операций формовки: полученные данные говорят о том, что результаты оказываются заниженными (по сравнению с прямым решателем) в среднем на 10-20%, что необходимо учитывать при оценке действительного состояния изделия.

Далее было проведено моделирование процесса изготовления детали «внутренняя часть капота» из сплава АМгЗ трех вариантов поставки

(отожженный, полунагартованный и без термообработки), механические свойства которых представлены в таблице 2, и получены следующие результаты. Значение утонения в изделии для всех вариантов состояния поставки сплава показано на рисунке 12. Видно, что для вариантов «сплав полунагартованный» и «без отжига» утонение в месте максимальной вытяжки значительно (81% и 71% соответственно), что приведет к разрыву в данной области. Для отожженного образца максимальное утонение составляет 32%.

Таблица 2 - Характеристики вариантов поставки сплава АМгЗ

Вариант сплава по ГОСТ 13726-97	Временное сопротивление σ_B , МПа	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение при разрыве δ_5 , %
Без термообработки	185	80	12
Отожженный	195	100	15
Полунагартованный	245	195	7

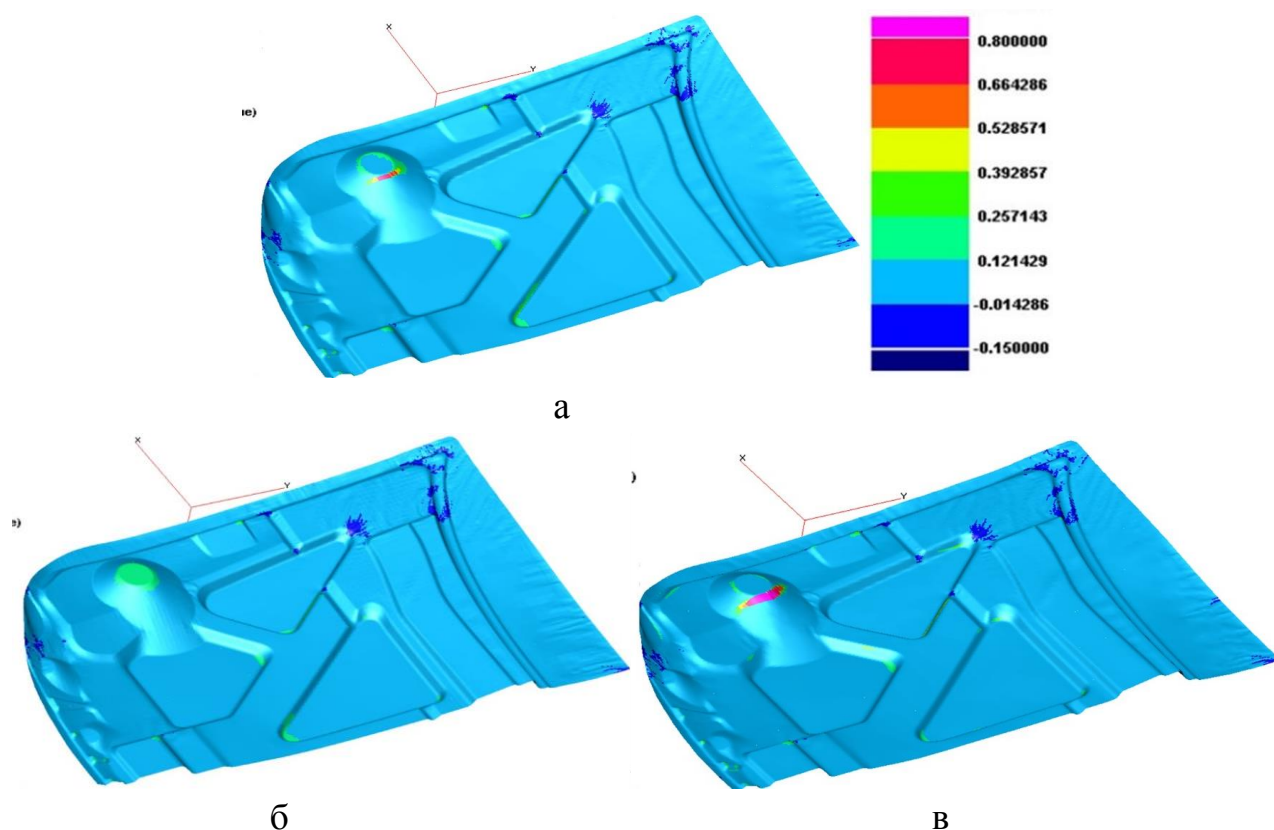


Рисунок 12 - Поле значений утонения (в долях от 1) в изделии «внутренняя часть капота» для вариантов сплава АМгЗ по ГОСТ 13726-97 без термообработки (а), отожженного (б), полунагартованного (в)

Также после снятия нагрузки произведена оценка пружинения в изделии. Для образца без термообработки максимальное пружинение составляет 16,83 мм. Для отожженного образца – 16,71 мм. А для образца полунагартованного максимальная величина пружинения равна 22,76 мм.

При применении варианта упрочненного состояния поставки сплава АМгЗ в процессе штамповки изделия появляются недопустимые утонения, тогда как для отожженного варианта сплава утонения значительно ниже. При этом в отожженном сплаве уровень остаточных напряжений и величина пружинения после снятия нагрузки сравнимы с нетермообработанным сплавом. Соответственно, листы сплава АМгЗ для выполнения подобных операций штамповки должны быть отожжены для повышения формуемости. Однако, необходимо учитывать, что применение отжига скажется на снижении прочности детали (по сравнению с полунагартованным вариантом поставки сплава). Таким образом, отслежено влияние вида кривой упрочнения на деформированное состояние для метода листовой штамповки.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

Итоги исследования заключаются в следующем.

1. Выполненные расчеты показали, что вид зависимости сопротивления деформации от степени деформации существенным образом влияет на однородность распределения деформации по объему заготовок при их формоизменении.
2. Выявлено, что наибольшей однородностью деформации отличается схема деформации металла с возрастающей кривой упрочнения, наименьшей – с убывающей кривой упрочнения. Промежуточное положение по степени однородности занимают неупрочняющиеся материалы и материалы с эффектом Портевена - Ле Шателье.
3. Выявлены параметры, необходимые для получения круглых в плане заготовок из квадратных в плане заготовок методом осадки с целью снижения отходов металла. На основе такой схемы деформации разработан новый способ определения коэффициента трения, защищенный патентом России.
4. Установлено различие между тангенциальной и радиальной компонентами тензоров деформаций и скоростей деформаций при осесимметричном прессовании прутковых заготовок, что сказывается на получении продукции с различными соотношениями параметров Кернса.

5. Сделан прогноз преобладания радиальной текстуры над тангенциальной в периферийных областях пресс-изделия при прессовании с малыми коэффициентами вытяжки альфа-сплавов титана. Для повышения параметра Кернса в радиальном направлении предложен новый способ производства титановых труб, защищенный патентом России.
6. Выявлено, что наибольшая протяженность пресс-утяжины наблюдается при прессовании упрочняющегося материала, а наименьшая – для прессования разупрочняющегося материала: при коэффициенте вытяжки 4 получено отношение между глубиной пресс-утяжины для упрочняющегося материала в 1,5 раза больше, чем для разупрочняющегося материала, а для вытяжки 16 отношение составляет 1,7.
7. Установлено, что в методе холодной листовой штамповки вид кривой упрочнения, связанный со способом предварительной термической обработки, сказывается на интенсивности локализации утонения заготовки: для вариантов состояния поставки сплава АМгЗ упрочненного в процессе штамповки изделия появляются недопустимые утонения (более 70%), тогда как для отожженного варианта сплава утонения значительно ниже (около 30%).

По итогам исследования выработаны следующие **рекомендации**.

1. При необходимости получить схему формоизменения с максимальной однородностью распределения деформации следует выбрать температурно-скоростные режимы, обеспечивающие наибольшее приращение сопротивления деформации в функции степени деформации.
2. В процессе получения заготовок типа круглых дисков целесообразно применять заготовки, квадратные в плане, что снижает отходы металла. В этой схеме деформации рациональными параметрами следует считать применение относительных обжатий не менее 60% и состояния контактной поверхности при коэффициенте трения на уровне 0,4...0,5.
3. Для достижения повышенных параметров Кернса трубных заготовок в радиальном направлении следует применять схему листовой прокатки и свертывания заготовки в трубу с учетом направления деформации.
4. Для снижения протяженности пресс-утяжины при прессовании следует использовать термомеханические параметры процесса, переводящие материал в состояние разупрочняющейся среды.
5. Для снижения опасности локализации деформации при листовой штамповке необходимо использовать материал с кривой упрочнения с наибольшим

градиентом повышения сопротивления деформации относительно степени деформации, что соответствует отожденному состоянию.

Перспективы дальнейшей разработки темы заключаются в расширении области моделирования процессов формоизменения с наделением материалов такими сложными свойствами как свойства, достигаемые в эффекте Портевена - Ле-Шателье. Это позволило бы оптимизировать режимы обработки металлов и сплавов с позиции нахождения параметров, управляющих распределением деформаций, как в скалярном, так и в тензорном виде.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Основное содержание диссертационной работы отражено в следующих печатных работах, опубликованных в научных журналах и изданиях, определенных ВАК:

1. Ершов, А.А. Тестирование системы «Deform» в режиме расчета деформации при прессовании титана в 2D и 3D-постановках. / Ю.Н. Логинов, А.А. Ершов, В.В. Котов // Титан. - 2011. - № 3 (33). - С. 18-24.
2. Ершов, А.А. Возможности QForm-Extrusion на примере прессования сложным профилей. / А.А. Ершов, В.В. Котов, Ю.Н. Логинов // Metallurg. - 2011. - № 10. - С. 32-38.
Ershov, A.A. Capabilities of QForm-Extrusion based on an example of the extrusion of complex shapes. / A.A. Ershov, V.V. Kotov, Yu.N. Loginov // Metallurgist. - 2012. - Т. 55. - № 9-10. - P. 695-701.
3. Ершов, А.А. Влияние вида кривой упрочнения на локализацию деформации при осадке титановых заготовок. / Ю.Н. Логинов, А.А. Ершов // Титан. - 2012. - № 1 (35). - С. 22-28.
4. Ершов, А.А. Аналитическое исследование с использованием МКЭ прессования α -титановых сплавов и прогнозом ориентации текстуры. / Ю.Н. Логинов, А.А. Ершов // Технология легких сплавов. - 2012. - № 3. - С. 79-87.
5. Ершов, А.А. Моделирование формовки панелей кузова автомобиля эластичным пуансоном в программном комплексе PAM-Stamp 2G. / А.А. Ершов, В.В. Котов, Ю.Н. Логинов // Metallurg. - 2012. - № 9. - С. 33-35.
Ershov, A.A. Modeling the formation of automobile body panels by an elastic punch in the software package PAM-Stamp 2G. / A.A. Ershov, V.V. Kotov, Y.N. Loginov // Metallurgist. - 2013. - Т. 56. - № 9-10. - P. 647-651.
6. Ершов, А.А. Оптимизация начальной формы заготовки в PAM-Stamp 2G. / А.А. Ершов, В.В. Котов, Ю.Н. Логинов // Metallurg. - 2012. - № 4. - С. 32-35.

- Yershov, A.A. Optimization of the initial form of a semifinished product in PAM-Stamp 2G. / A.A. Yershov, V.V. Kotov, Yu.N. Loginov // Metallurgist. - 2012. - Т. 56. - № 3-4. - Р. 231-235.
7. Ершов, А.А. Расчет компенсации штампового инструмента после пружинения в программном комплексе PAM-Stamp. / А.А. Ершов, В.В. Котов, Ю.Н. Логинов // Metallurg. - 2012. - № 7.- С. 24-26.
Ershov, A.A. Calculation of the compensation of a stamping tool after springback in the software package PAM-Stamp. / A.A. Ershov, V.V. Kotov, Y.N. Loginov // Metallurgist. - 2012. - Т. 56. - № 7-8. - Р. 477-481.
 8. Ершов, А.А. Моделирование в программном комплексе QForm образования пресс-утяжины при прессовании. / Ю.Н. Логинов, А.А. Ершов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. - 2013. - № 7. - С. 42-46.
 9. Ершов, А.А. Применение обратного решателя Inverse в PAM-Stamp 2G для оценки формруемости детали. / А.А. Ершов, Ю.Н. Логинов // Metallurg. - 2013. - № 5. - С. 24-28.
Ershov, A.A. Using the Inverse solver in Pam-Stamp 2G to assess the formability of a part. / A.A. Ershov, Yu.N. Loginov // Metallurgist. - 2013. - Т. 57. - № 5-6. - Р. 372-377.
 10. Ершов, А.А. Изучение с помощью программы PAM-Stamp влияния состояния поставки металла на формемость при штамповке. / А.А. Ершов, Ю.Н. Логинов // Metallurg. - 2014. - № 3. - С. 38-41.
 11. Ершов, А.А. Определение коэффициента трения при пластической деформации осадкой призматических образцов. / Ю.Н. Логинов, А.А. Ершов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. - 2014. - Т.80. - №8. - С.51-56.

Патенты:

12. Патент РФ RU 2 505 797. Способ определения коэффициента трения при пластической деформации / Логинов Ю.Н., Ершов А.А. Заявка №2012109302 от 12.03.2012. Заявитель Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. МПК G01N 19/02. Опубл. 27.01.2014. Бюл. 3.
13. Патент РФ RU 2 504 598. Способ получения трубы из технически чистого титана с радиальной текстурой / Логинов Ю.Н., Ершов А.А. МПК C22F1/18, B21B17/00, B23K103/14. Заявка №2012107940/02 от 01.03.2012. Заявитель

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. Оpubл.: 20.01.2014 Бюл. 2.

Другие публикации:

14. Ершов, А.А. Моделирование формовки панелей кузова автомобиля эластичным пуансоном в программном комплексе RAM-Stamp 2G. / А.А. Ершов, В.В. Котов, Ю.Н. Логинов//Технология колесных и гусеничных машин - Technology of Wheeled and Tracked Machines. - 2013. - № 2 (6). - С. 16-19.
15. Ершов, А.А. Влияние кристаллической решетки циркония и его сплавов на особенности процессов их деформации. /А.А. Ершов, Ю.Н. Логинов// Доклады 18-й межд. конф. молодых ученых по приоритетным направлениям развития науки и техники. - Екатеринбург: УрФУ. - 2010. - С. 51-55.
16. Ершов, А.А. Перспективы управления текстурой деформации в ГПУ – металлах. /Ю.Н. Логинов, А.А. Ершов // Образование и производство - 2010: сб. трудов регион. науч.-техн. конф. - Верхняя Салда. - 2010. - С.135-138.
17. Ершов, А.А. Инновации в проектировании технологии прессования: применение пакета QForm-Extrusion. / А.А. Ершов, В.В. Котов, Ю.Н. Логинов // Инновации в материаловедении и металлургии: сб. материалов 1 межд. конф.: в 2 частях. - Екатеринбург. УрФУ. - 2012. - С. 73-83.
18. Ершов, А.А. Соотношения радиальных и тангенциальных деформаций в процессе прессования. / Ю.Н. Логинов, А.А. Ершов // Инновационные технологии в металлургии и машиностроении: сб. науч. трудов. - Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та. - 2012. - С. 31-37.
19. Ершов, А.А. Решение задачи прессования пористого титанового электрода конечно-элементным методом. / А.А. Ершов, Н.А. Шалаев, Ю.Н. Логинов // 12 межд. науч.-техн. уральская школа семинар металловедов – молодых ученых: сб. трудов. - Екатеринбург: УрФУ. - 2011. - С. 164 – 166.
20. Ершов, А.А. Сравнительный анализ патентной документации, касающейся способов обработки материалов с ГПУ – решеткой. / А.А. Ершов, Ю.Н. Логинов // 12 межд. науч.-техн. уральская школа семинар металловедов – молодых ученых: сб. трудов. - Екатеринбург: УрФУ. - 2011. - С. 158 – 160.